

阪神高速道路における既設鋼桁疲労照査法の提案

～ 実態活荷重データを用いた疲労照査法 ～

阪神高速道路(株)技術部技術推進室 藤林 美早
阪神高速道路(株)技術部技術推進室 西岡 勉

要 旨

道路構造物の高齢化や老朽化が進む中、他団体では鋼桁橋の主桁に大きく進展した疲労き裂が報告されており、阪神高速道路でも供用年数の増加に伴い、将来重大な疲労き裂の発生が懸念される。現在事業化されている特定更新等工事では鋼桁の疲労損傷に対する予防保全対策を行う予定であり、対策箇所選定のため疲労照査を行っている。本稿では、「鋼道路橋の疲労設計指針」での疲労照査の考え方にに基づき、阪神高速道路での交通特性を反映させることで、より実態に見合った疲労照査法を提案する。

キーワード: 疲労照査, 鋼桁, 頻度補正係数, 同時載荷係数, 実態活荷重

はじめに

道路構造物の高齢化や老朽化が進む中、他団体では**写真-1**のような鋼桁橋の主桁に大きく進展した疲労き裂が報告されている。鋼道路橋の疲労設計は、「道路橋示方書・同解説¹⁾」の平成 14 年 3 月改訂時に導入されており、「鋼道路橋の疲労設計指針²⁾」(以下、「疲労指針」)が新設橋梁を対象として発刊された。阪神高速道路における鋼桁のほとんどは疲労設計が導入される以前に建設されており、将来重大な疲労き裂の発生が懸念される。このため、平成 27 年度より事業着手した特定更新等工事では、このような鋼桁に対し予防保全対策を実施予定であり、対策箇所選定のため疲労照査にて疲労き裂の発生に対するリスクを評価し、優先度を付ける必要がある。

疲労照査時には疲労設計荷重を移動載荷させた場合に生じる応力範囲や、載荷回数を考慮した累

積疲労損傷度を算出する。疲労指針ではこれらの算出時に用いる補正係数を、交通量の多い国道における活荷重特性に基づき設定している。阪神高速道路では過年度に活荷重実態調査を実施しており、実橋での実態活荷重データが取得できている。よって、この実橋での調査結果を疲労照査法に反映することができれば、より阪神高速道路の実態に即した疲労照査法となり合理的である。以上より、本稿では疲労指針での照査の考え方にに基づき、各種係数に阪神高速道路での交通特性を反映させ、疲労照査法として提案することを目的とした。



写真-1 他団体での主桁に発生した疲労き裂事例

1. 検討方針

1-1 疲労照査の流れ

疲労指針での照査の流れを図-1に示す。

疲労指針では、最初に「応力照査が不要な条件」すべてに該当するかどうかを確認する。すべてに該当する場合、疲労に対する安全性は確保されているとみなすことができ、疲労照査は終了となる。一方、すべてに該当しない場合、応力照査を行う必要がある。応力照査は設計供用年数や大型車交通量などの照査条件を設定したうえで、疲労設計荷重として定めたT荷重1組が移動載荷した場合の応力範囲を算出し、照査対象とする継手の強度等級により決まる打ち切り限界と比較する（照査①）。算出した応力範囲が打ち切り限界より小さい場合は疲労に対するリスクは小さく、疲労照査は終了となるが、大きい場合は累積損傷度及び疲労寿命を算出する（照査②）。累積損傷度は照査①にて算出した応力範囲を用いて、設計で考慮する期間の大型車交通量を加味して求める。

ここで、応力範囲の算出時には様々な車両の走行による影響をT荷重で代表させたことに対する補正としてT荷重補正係数、同時載荷係数、衝撃係数、構造解析係数が用いられる。また、累積疲労損傷度の算出時には載荷回数算出時の補正係数として頻度補正係数が用いられる。

本稿では図-1中の照査②にて使用する係数の提案を対象としており、照査①にて使用する係数は安全側の照査とするため疲労指針と同じとした。

40.8%であった。トレーラー類と大型車類タンデム軸を合わせると車重損傷度は94.5%となり、ほとんどを占める。

疲労指針では交通量の多い国道における実交通荷重により各種係数が設定されている。この各種係数設定の元とされている車重損傷度構成比と阪神高速道路での車重損傷度構成比を比較したものを図-3に示す。図-3より、疲労指針での係数設定の根拠とされている交通特性に比較すると阪神高速道路は、車重50tf以上の重量車の割合が小さい傾向にある。なお、図-2の縦軸は1tf刻みであるが、図-3では2tf刻みであるため、図-3での車重損傷度構成比は図-2での2tfごとの車重損傷度構成比を合わせた数値で表示している。

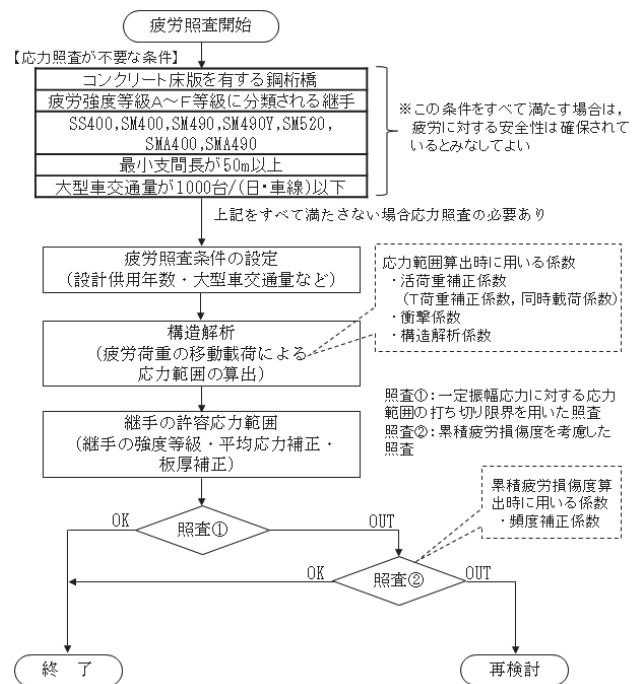


図-1 疲労指針での疲労照査の流れ

1-2 阪神高速道路の交通特性

本稿では平成22年に表-1に示す6箇所の集約料金所で計測された実態活荷重の計測データを用いた。計測は各24時間連続で行われ、車種、軸数、軸重、車重等のデータが得られている。実態活荷重調査の結果による車重損傷度構成比を図-2に示す。トレーラー類の台数構成比は全体の3.3%であるが、車重損傷度は最も大きく53.7%であった。次に、大型車類タンデム軸の台数構成比は全体の9.8%であるが、重量損傷度構成比は

表-1 実態活荷重の調査箇所

路線名	上下区分	料金所名
5号湾岸線	下	南芦屋浜
	上	中島
4号湾岸線	上	高石
14号松原線	上	大和川
3号神戸線	下	芦屋
	上	尼崎

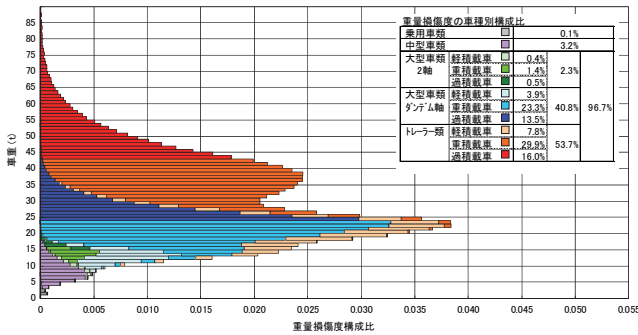


図-2 阪神高速道路での車重損傷度構成比

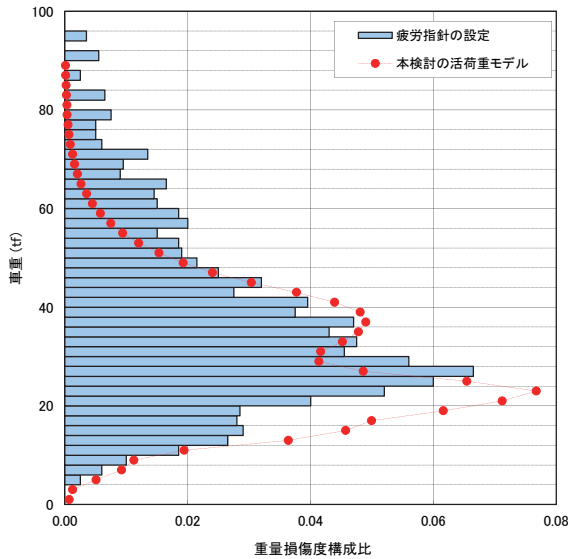


図-3 車重損傷度構成比の比較

1-3 検討方針

疲労指針での T 荷重補正係数は、設計で考慮する期間に載荷される可能性のある最重量級の自動車荷重の影響を考慮するとともに、実車両の様々な軸間距離や軸数による応力変動を T 荷重にて表現することを補正する係数として設定されている。また、設定時には疲労に及ぼす影響が支配的であるとして、大型ダンプを基にしている。

ここで、大型ダンプは軸間距離が約 4m と短く、1 本の集中荷重で与える場合と軸位置を考慮した場合の応答差は小さい。しかし、阪神高速道路では前述のようにトレーラー類や大型車タンDEM軸による疲労への影響が大きいことが分かっているので、軸位置の影響を考慮するため、図-4 に示すように支間長 30m の単純桁に対して 60ton の集中荷重が作用した場合と総重量 60ton のトレーラーが 3 軸で載荷された場合の曲げモーメントを比較した。その結果、前者に対して後者は 74%

となり、累積疲労損傷度の違いは 3 乗で生じるため $0.74^3 \approx 0.4$ 倍となる。このように車両毎に異なる軸位置の影響を考慮できればより合理的な疲労照査が可能となる。

また、疲労指針での頻度補正係数は、車両重量の頻度分布形状と着目部位に生じる変動応力範囲の頻度分布形状が相似であると仮定して算出されている。しかし、前述のように軸位置の影響により生じる応答差の影響を考慮したほうがより実橋での状況に近いと見做すため、重量や軸位置の異なる各種車両による応答値分布を適切に評価した方が合理的である。本稿では、このような応答値分布の補正は、T 荷重そのものに関わる T 荷重補正係数としてではなく、応答の頻度に関わる係数として評価する方が分かりやすいと考え、「応答に対する頻度補正係数」として算出した。すなわち、疲労指針では T 荷重補正係数として考慮されている支間長や実車両の軸間距離等による影響を本稿では「応答に対する頻度補正係数」に取り入れた。これにより、T 荷重補正係数はこれらの影響を考慮しない一定値の 3.0 と設定し、照査②にて累積疲労損傷度を算出する際には「T 荷重×3.0」を用いて変動応力の算出を行う。

また、実態活荷重データを用いた活荷重シミュレーションを行い、同時載荷係数も算出した。

なお、衝撃係数や構造解析係数の評価には実橋計測のデータが必要であるが、今回はデータ数が少ないことから、本検討では対象としていない。

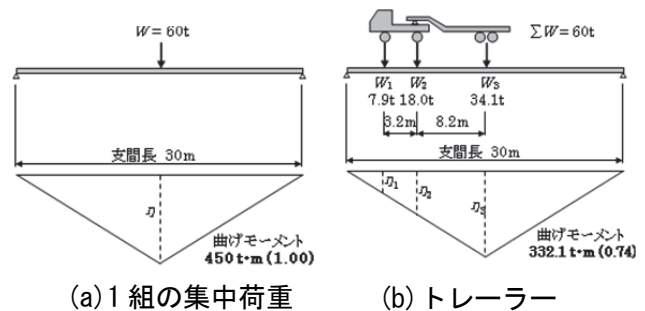


図-4 軸位置による曲げモーメントの違い

2. 係数の提案

2-1 応答に対する頻度補正係数

疲労指針での頻度補正係数は、疲労設計荷重の載荷頻度として大型車交通量をそのまま用いることは適切でないため、その影響を考慮するために設定されている。疲労指針では、前述のとおり車両重量の頻度分布形状と着目部位に生じる変動応力範囲の頻度分布形状が相似であると仮定し、代表荷重 60tf に基づき設定されている。

本稿ではここに軸位置の影響を考慮するため、実橋で取得した実態活荷重データより全車両の軸重と軸間距離の影響を考慮したうえで影響線載荷し、応答に対する頻度補正係数を算出した。この際、最大応答が打ち切り限界以上となる車両のみ 3 乗平均を求め、これと疲労照査荷重 1 組による応答の 3 乗との比により算出した。なお、算出時の支間長は、疲労耐久性の低い橋梁として抽出していた実橋の 24.4m 及び支間長の違いによる影響を確認するため 50m とした。図-5 に算出結果を示す。図-5 での横軸は、打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ve}$ に対する最大応力振幅 $\Delta\sigma_{max}$ の比を表す係数 α である。

図-5 より、応答に対する頻度補正係数は集約料金所毎に異なる。例えば、①大和川と②南芦屋を比較すると①大和川の方が 1/2 程度小さい。これは、②南芦屋浜のトレーラー類の混入率が 20% 台と突出して多いためである。このように計測箇所による違いは確認できるものの、十分なデータ数ではないため、本稿では計測箇所の区別をせず、すべての結果を満足する値として応答に対する頻度補正係数を設定した。図-5 より、支間長の短い 24.4m は疲労損傷が発生する可能性が高くなるが、横軸の α が大きくなっても 0.02 を超えることはなかった。また、 α が大きくなるほど最大応力値が大きくなり、疲労に対するリスクが大きくなるが、支間長 50m の場合は α が十分大きい 5.0 程度まで考慮しても 0.02 以下であった。以上より、疲労指針での 0.03 に対して本稿では全線を網羅する値として 0.02 を提案する。これは、トレーラー類と大型車類タンデム軸が多いという阪神高速道路の交通特性を軸位置の影響を含めて考慮した結果である。

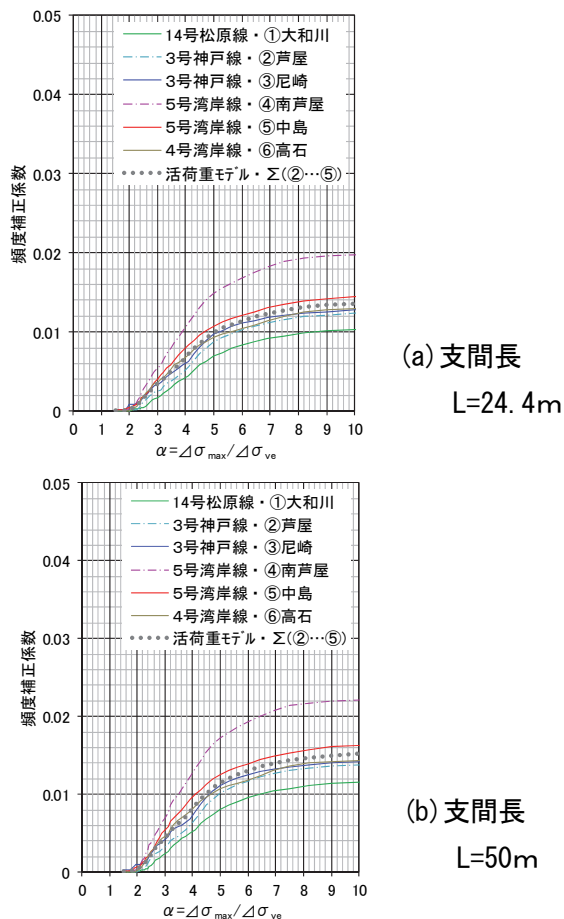


図-5 応答頻度補正係数の算出結果

2-2 同時載荷係数

疲労指針での同時載荷係数は複数の車両が同時に載荷されることによる影響を考慮する係数であり、本稿でも疲労指針の考え方にに基づき、実橋 4 橋梁を対象に活荷重シミュレーションを行い同時載荷の有無による比率を算出した。4 橋梁の諸元を表-2 に示す。4 橋梁は交通量、設備数量、支間長、竣工年度などの条件から、疲労に対するリスクが高いと考えられる橋梁として抽出した鋼単純合成 I 桁橋、鋼連続非合成 I 桁橋である。

同時載荷係数の算出結果を図-6 に示す。図-6 より鋼単純合成 I 桁は 1.04~1.08、連続非合成 I 桁は 0.98~1.03 であり、阪神高速道路は疲労指針での交通量の多い国道に比して同時載荷の影響を受ける特性があることが分かった。以上より、本稿では疲労指針での 1.0 に対して安全側の設定となるが、影響線が正負交番しない場合は 1.1、正負交番する場合は 1.05 を提案する。

表-2 橋梁諸元

管理番号	橋梁形式	支間長(m)	竣工年度
神S614	鋼単純合成I桁	24.4	1968
神S658	鋼単純合成I桁	37.4	1968
神S500-502	鋼連続非合成I桁	24.7+25.0+24.7	1966
神S489-491	鋼連続非合成I桁	32.7+33.0+32.7	1965

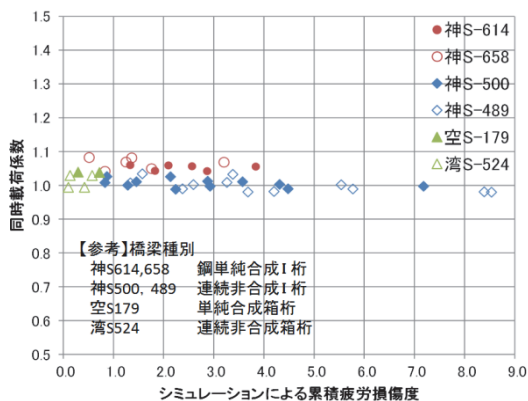


図-6 同時載荷係数の算出結果

2-3 その他の改善点

実橋にて総重量 25ton の試験車を走行させた際の主桁に発生する応力を計測した結果を図-7 に示す。走行車両による桁挙動は鋼桁とコンクリートとの付着やスラブアンカー等の合成効果により合成桁としての挙動を示すため、変動応力の算出時には非合成桁を合成桁として取り扱う。

3. 提案照査法による疲労照査

本稿での提案法の妥当性を確認するため、①疲労指針、②提案法、及び③実橋計測（応力頻度計測）による疲労照査結果を比較した。ここで、大型車交通量は過年度に神戸線での現地計測時に整理された14,000台/日/方向とした。表-2の4橋梁に対する算出結果を表-3に示す。

表-3より、①疲労指針に対する②提案法の疲労寿命の比は、鋼単純合成I桁ではE等級で1.04～1.14、G等級で1.12～1.16とほぼ同等であり、鋼連続非合成I桁橋ではE等級で1.28～3.80、G等級で1.29～2.29であった。②提案法は①疲労指針に対してやや寿命が長くなる傾向であった。疲労寿命の増加率の内訳は、応答頻度補正係数により約5割の増加、同時載荷係数に対するにより約2割の減少が生じており、これらを併せた約3割の増加

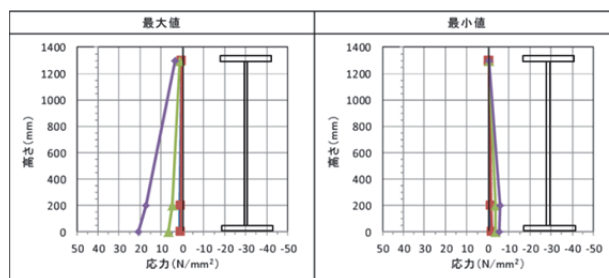


図-7 試験車走行時の主桁内面応力分布 (G1 桁)
(試験車 25ton, 鋼 3 径間連続 I 桁 (3@25m))

表-3 各手法による疲労寿命の算出結果

		E等級						G等級					
		疲労指針		提案		②/①		疲労指針		提案		③/①	
		①	②	②/①	①	②	②/①	①	②	②/①	③/①	③/②	
鋼単純合成I桁橋	神S614	G1	23	26	1.13	16	18	1.13	74	4.6	4.1		
		G2	29	33	1.14	19	22	1.16	17	0.9	0.8		
		G3	47	49	1.04	28	32	1.14	77	2.8	2.4		
	神S658	G1	∞	∞	-	22	25	1.14	24	1.1	1.0		
		G2	∞	∞	-	33	37	1.12	52	1.6	1.4		
		G3	∞	∞	-	68	77	1.13	∞	-	-		
鋼連続非合成I桁橋	神S500-502	中央径間中央	G1	8	23	2.88	6	10	1.67	35	5.8	3.5	
		G2	16	45	2.81	11	19	1.73	70	6.4	3.7		
		G3	31	86	2.77	23	31	1.35	∞	-	-		
	側径間L/4	G1	10	38	3.80	7	16	2.29	46	6.6	2.9		
		G2	21	∞	-	14	27	1.93	∞	-	-		
		G3	42	∞	-	29	42	1.45	∞	-	-		
神S489-491	中央径間中央	G1	7	22	3.14	7	11	1.57	-	-	-		
		G2	10	29	2.90	10	14	1.40	-	-	-		
		G3	21	55	2.62	20	26	1.30	-	-	-		
	側径間L/4	G1	13	17	1.31	6	8	1.33	-	-	-		
		G2	20	26	1.30	9	12	1.33	-	-	-		
		G3	36	46	1.28	17	22	1.29	-	-	-		

は係数の見直しによるものと考えられ、それ以外には非合成桁を合成桁とした影響と考えられる。

また、表-3より、①疲労指針及び②提案法による疲労寿命は③実橋計測に対して短い傾向にある。ここで、③実橋計測では神S614のG2桁及び神S658のG1桁にて腹板の板曲げや応力集中が生じており、疲労寿命は17年及び24年という短い結果であった。これに対し②提案法では22年及び25年であり、若干長くなるものの実橋計測と同等の疲労寿命である。この結果より、提案法は実橋にて板曲げや応力集中が生じている場合も含めて適用できる可能性がある。

4. まとめ

本検討での提案内容を表-4に示す。疲労指針と本検討での提案法による疲労寿命の推定を行った結果、単純合成I桁ではほぼ同程度、連続非合成I桁ではやや長くなる結果であった。実橋計測による結果と比較するといずれも短く、安全側である

表-4 本検討での提案

		鋼道路橋の疲労設計指針	本検討での提案																
疲労設計荷重		T荷重: 200 kN	同左																
変動応力の算出方法		特に指定なし	三次元FEM解析あるいは骨組解析または格子解析による。非合成桁は合成桁として算出する。																
活荷重補正係数 γ_T	T荷重補正係数 γ_{T1}	$\gamma_{T1} = \text{Log } L_{B1} + 1.50$ ($2.00 \leq \gamma_{T1} \leq 3.00$) ここに、 L_{B1} : T荷重補正係数算出時の基線長(m)	照査①では、疲労指針と同じ。 照査②では、T荷重補正係数を一定の3.0と設定。 (※支間長や軸位置の影響は応答に対する頻度補正係数で考慮)																
	同時載荷係数 γ_{T2}	・影響線が正負交番する場合は1.0	・影響線が正負交番する場合は1.05																
		・正負交番しない影響線形状を有する場合は下表	・正負交番しない影響線形状を有する場合は下表																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>$L_{B2} \leq 50\text{m}$</th> <th>$50\text{m} < L_{B2}$</th> <th></th> <th>$L_{B2} \leq 50\text{m}$</th> <th>$50\text{m} < L_{B2}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ADTT_{SLi} ≤ 2000</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>ADTT_{SLi} ≤ 2000</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>2000 < ADTT_{SLi}</td> <td>1.0</td> <td>1.1</td> <td>2000 < ADTT_{SLi}</td> <td>1.1</td> <td>1.1</td> </tr> </tbody> </table>		$L_{B2} \leq 50\text{m}$	$50\text{m} < L_{B2}$		$L_{B2} \leq 50\text{m}$	$50\text{m} < L_{B2}$	ADTT _{SLi} ≤ 2000	1.0	1.0	ADTT _{SLi} ≤ 2000	1.0	1.0	2000 < ADTT _{SLi}	1.0	1.1	2000 < ADTT _{SLi}	1.1
	$L_{B2} \leq 50\text{m}$	$50\text{m} < L_{B2}$		$L_{B2} \leq 50\text{m}$	$50\text{m} < L_{B2}$														
ADTT _{SLi} ≤ 2000	1.0	1.0	ADTT _{SLi} ≤ 2000	1.0	1.0														
2000 < ADTT _{SLi}	1.0	1.1	2000 < ADTT _{SLi}	1.1	1.1														
L_{B2} : 同時載荷係数算出時の基線長(m) ADTT _{SLi} : 一方向一車線当たりの日大型車交通量(台/(日・車線))		※本検討では2000 < ADTT _{SLi} 、 $L_{B2} \leq 50\text{m}$ の係数のみ検討																	
頻度補正係数		代表的な一般国道の実交通より0.03を標準。	実態活荷重調査データより支間長や軸位置の影響を考慮し、応答に対する頻度補正係数として、全路線に対し0.02を設定。																

が、疲労指針に比べると提案法の方が実橋に近い結果が得られており、提案法は疲労指針に比して阪神高速道路の交通特性を反映していると考えられる。今後、阪神高速道路の既設鋼桁を対象に疲労照査を行う際は、提案法を使用した方が合理的である。最後に、提案法は実橋計測による疲労照査結果と比較し、安全側の評価であり、より実態に即した疲労照査法とするためには、路線ごとの交通特性を考慮することなどが考えられる。また、新たに実態活荷重データが得られた際にはその結果を反映させることも有効である。

謝辞

本照査法の提案に際し、阪神高速道路株式会社技術審議会構造技術委員会鋼橋疲労分科会（主査：舘石和男名古屋大学教授）の委員各位に貴重なご意見を頂きました。関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 平成14年3月
- 2) (社) 日本道路協会, 鋼道路橋の疲労設計指針, 平成14年3月

PROPOSING THE METHOD OF FATIGUE CHECK FOR EXISTING STEEL GIRDERS OF THE HANSHIN EXPRESSWAY

Misa FUJIBAYASHI, Tsutomu NISHIOKA

There have been reports by other road organizations about severe fatigue cracks found in steel main girders as a result of advanced deterioration of road structures. It is highly possible that cracks of the same type will occur on the Hanshin Expressway. This study proposed a method of fatigue check developed for existing steel girders of the Hanshin Expressway, based on the Guidelines for Fatigue Design of Steel Highway Bridges. In order to make the method more realistic, actual characteristics of the traffic on the Hanshin Expressway were taken into account by using two coefficients for correction of load frequency distribution and consideration of simultaneous loading.

藤林 美早



阪神高速道路株式会社
技術部 技術推進室
Misa Fujibayashi

西岡 勉



阪神高速道路株式会社
技術部 技術推進室
Tsutomu Nishioka